System Engineering and Productivity/ 2025/ Vol.5/ No.3/ 179-198

System Engineering and Productivity

DOI: 10.22034/sep.2025.2063697.1333

Evaluation and Prioritization of Electricity Generation Technologies in Iran Using a Multi-criteria Decision-making Approach

Mona Avazpour [1], **Javad Zarei** [2*], **Esmaeil Alinezhad** [2]

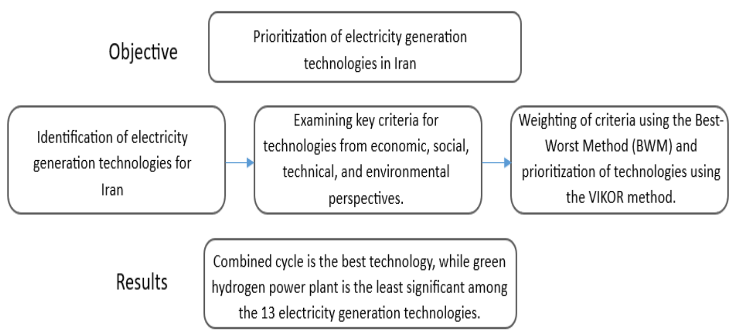
[1] B.Sc., Department of Industrial Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran

[2] Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran

HIGHLIGHTS

- Prioritization of 13 power generation technologies using multi-criteria decision-making.
- Evaluation and identification of economic, environmental, social and technical indicators.
- Weighting of indicators using the best-worst method (BWM) and ranking of power generation technologies using the VIKOR method.
- Selection of combined cycle as the best technology and green hydrogen power plant as the least important technology.

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Article history:
Article Type: Research paper
Received: 14 June 2025
Revised: 2 July 2025
Accepted: 13 July 2025
Available online: 13 July 2025

*Correspondence:
j.zarei@sutech.ac.ir

How to cite this article:
Avazpour, M., Zarei, J., & Alinezhad, E. 2025. Evaluation and prioritization of electricity generation technologies in Iran using a multi-criteria decision-making approach. *System Engineering and Productivity*, 5 (3), 179-198.

Keywords:
Energy
Electricity generation technologies
Multi-Criteria Decision Making (MCDM)
Best-Worst Method (BWM)
VIKOR Method

ABSTRACT

Energy is one of the main pillars of economic and social development of societies and plays a fundamental role in areas such as industry, transportation, agriculture, and daily life. In the meantime, electricity, as one of the most important forms of energy, has gained a special place, and the increase in demand for it has increased the importance of choosing appropriate methods of electricity generation. There are several methods for electricity generation, such as gas power plants, combined cycle, coal, nuclear, solar, wind, hydro, geothermal, etc., each of which has different characteristics and consequences. Considering the differences in performance, cost, environmental impacts, and social dimensions of these methods, prioritizing electricity generation technologies is an important step towards achieving sustainable development and optimal decision-making in the energy sector. This manuscript aims to identify and prioritize electricity generation technologies using qualitative and quantitative criteria in Iran. Therefore, first, electricity generation technologies are identified, and the values of environmental, social, economic, and technical indicators such as greenhouse gas emissions, cost per kilowatt-hour of electricity, initial investment, employment rate, etc. are extracted for each technology. Finally, using the Best-Worst method, the weights of the indicators are determined, and using the VIKOR multi-criteria decision-making method, electricity generation technologies are prioritized. The results show that the combined cycle is the best technology and the green hydrogen power plant is the least preferred technology among the 13 electricity generation technologies.

1. Introduction

Energy is one of the most fundamental needs of modern societies and plays a central role in economic, social, and industrial growth. Since the Industrial Revolution, its importance has steadily increased, and it is now regarded as the driving force behind development (World Bank Energy Overview, 2024). Iran is among the leading countries in the Middle East in terms of energy production and consumption. With its vast oil and natural gas reserves, the country can meet a significant portion of its energy demand (U.S. Energy Information Administration, 2024). In Iran, natural gas and oil account for nearly all primary energy consumption, while the contribution of other sources—such as hydropower, coal, nuclear, and renewables—remains limited (Abdolahinia, et al., 2024). Given the growing demand for electricity and the need to build new power plants, prioritizing generation technologies based on a multifaceted approach will become a major challenge for policymakers. This issue can be examined from several perspectives. First, diversifying the energy mix is crucial since heavy reliance on fossil fuels poses environmental challenges, making a comprehensive evaluation of alternatives necessary. Second, decisions based solely on economic factors, without considering technical, social, and environmental dimensions, may result in unsustainable outcomes. Finally, the global shift toward renewable energy and the necessity to reduce greenhouse gas emissions makes re-evaluation unavoidable. Unlike many previous studies that have focused on a limited range of technologies or criteria, this paper will propose a systematic framework based on multi-criteria decision-making. We will consider indicators in four dimensions to prioritize renewable and non-renewable electricity generation technologies. Technical factors will include efficiency, capacity factor, previous experience and skills, accessibility, reliability, and expandability. Economic factors will cover investment costs, operational costs, internal rate of return (IRR), and service life. Social factors will involve local development, social benefits, employment opportunities, and public acceptance. Environmental indicators will include greenhouse gas emissions, water consumption, land use, and waste production. The criteria applied will not only be more diverse but also more detailed than in previous research. Another key distinction is that, for the first time, 13 major technologies including fossil fuel-based, renewable, and emerging options will be evaluated within a coherent and integrated framework. Methodologically, the study will combine the Best-Worst Method (BWM) to determine the weights of the criteria with the VIKOR method to rank the alternatives. This integration will provide greater robustness, transparency, and reliability compared to traditional approaches. Accordingly, this study aims to address three main questions:

1. Which electricity generation technologies will be prioritized based on the proposed framework?
2. What advantages will the integration of BWM and VIKOR provide compared with traditional approaches?
3. How will Iran's unique conditions influence the evaluation and prioritization of electricity generation technologies?

2. Methodology

This study employs a multi-criteria decision-making (MCDM) approach to evaluate electricity technologies. The Best–Worst Method (BWM) is applied for criteria weighting due to its consistency and reduced need for pairwise comparisons. In contrast, the VIKOR method is used for ranking alternatives as it provides a compromise solution in problems with conflicting criteria.

2.1. Weighting method

For criteria weighting in multi-criteria decision-making (MCDM), various approaches, such as the Analytic Hierarchy Process (AHP), Analytic Network Process (ANP), entropy-based methods, and more recent models like the Best–Worst Method (BWM), are commonly applied. In this study, the BWM was selected due to its requirement for fewer pairwise comparisons and its ability to generate more consistent results (Rezaei, 2015). In this method, the decision-maker first defines the evaluation criteria and identifies the best and worst criteria. Subsequently, all criteria are compared with the best and worst ones on a 1–17 scale, resulting in two preference vectors. The optimal weights are then derived by minimizing the maximum deviations between comparisons while satisfying non-negativity and normalization constraints. Finally, a consistency ratio is calculated to assess the reliability of the obtained weights.

2.2. Ranking method

For ranking alternatives, several MCDM techniques are available, such as TOPSIS, PROMETHEE, WASPAS, and VIKOR. In this study, the VIKOR method was chosen because it can provide a compromise solution when criteria conflict, which is particularly important in energy-related problems

where economic, technical, environmental, and social indicators may diverge (Opricovic, 1988). The method involves constructing a decision matrix from performance data, normalizing it to remove scale differences, identifying ideal and anti-ideal solutions for each criterion, and calculating the relative distance of each alternative from these ideals. Based on these distances, a compromise ranking is derived, identifying the alternative closest to the ideal as the preferred choice.

3. Results and Discussion

This study evaluates thirteen power generation technologies in Iran using seventeen key indicators, which are categorized into four main groups: technical, economic, environmental, and social. Data for all technologies are collected and analyzed, and the Best–Worst Method (BWM) is applied to determine the weight of each indicator. The final weights of the indicators are calculated, revealing that technical indicators are the most significant, while social indicators are the least important. For the final ranking of the technologies, the VIKOR method is applied (v = 0.5), which balances group utility maximization, reflecting overall project success and stakeholder satisfaction, with individual regret minimization, aimed at avoiding extreme negative impacts on specific options. The prioritization of the electricity generation technologies is presented in Table 1.

Table 1. Prioritizing electricity generation technologies in Iran

Technology	Priority
Combined Cycle	1
Gas	2
Photovoltaic (PV)	3
Diesel	4
Hydro	5
Wind	6
Oil	7
Concentrated Solar Thermal (CSP)	8
Biomass	9
Geothermal	10
Nuclear	11
Coal	12
Green Hydrogen	13

The analysis reveals that Combined Cycle technology holds the highest priority, primarily due to its high efficiency and Iran's abundant natural gas resources. Natural gas power plants rank second, benefiting from low production costs, wide fuel availability, and relatively low environmental impacts compared to other fossil-based options. Photovoltaic (PV) power ranks third, benefiting from Iran's high solar irradiance, ease of installation, and strong suitability for remote regions. In contrast, Green Hydrogen is placed at the lowest priority, as it requires advanced technology, substantial infrastructure, and significant investment, all of which are currently unavailable under Iran's economic and technological constraints.

In a country like Iran, which has abundant and inexpensive natural gas resources, the use of combined-cycle power plants is both logical and cost-effective. Following this, natural gas technology ranks second. With the world's second-largest natural gas reserves, Iran holds a privileged position to leverage gas-fired power plants, which significantly reduce the costs of electricity production and transmission while enhancing energy independence. It should be noted that natural gas is one of the cleanest fossil fuels, with relatively low environmental impacts compared to other fossil fuels, making it a key reason for its selection. Photovoltaic solar technology ranks third due to Iran's high solar radiation and the potential for widespread utilization. With more than 300 sunny days per year, Iran is one of the most suitable countries for developing this energy source. Additionally, the ease of installation, low maintenance costs, and applicability in remote areas are other advantages of this technology; thus, photovoltaic solar technology is considered the best renewable option for electricity generation.

Diesel technology ranks fourth. Although it has high pollution levels and higher fuel costs compared to other options, its high flexibility, rapid deployment capability, and lack of dependence on a national grid make it noteworthy, especially in emergency situations and underserved regions. Hydroelectric power plants, relying on Iran's long-standing experience and domestic water resources, rank fifth. Despite the water crisis, there remain exploitable potentials in some areas of the country.

Wind turbines, due to the high wind capacity in regions like Manjil and Sistan and their environmental benefits, rank sixth. However, high costs and the need for precise grid load management remain major barriers to their widespread development. Oil-based technology (petroleum coke and liquid fuels) ranks seventh. Due to the extensive oil infrastructure and available resources, it remains a relevant option. However, its use is gradually declining due to environmental concerns. Concentrated solar power (CSP) technology, despite its advantages in energy storage and continuous electricity production, ranks eighth due to its technical complexity and high

construction costs. This technology requires large spaces and regions with consistent, intense solar radiation. Biomass technology, based on the use of agricultural, urban, and industrial waste, ranks ninth. It can play a significant role in waste management and pollution reduction; however, the lack of a suitable supply chain and technical infrastructure limits its share in the country's energy mix. Geothermal energy ranks tenth. Although it offers high sustainability in electricity production, the need for significant initial investment, deep drilling, and specialized technology has slowed its development. Nuclear energy ranks eleventh. Despite its high electricity generation capacity, safety concerns, environmental issues, high costs, and political and international considerations have limited its use in Iran. Coal ranks twelfth. Its extremely high pollution levels, global pressure to reduce fossil fuel use, and environmental policies are the primary reasons for its declining priority in Iran. Finally, green hydrogen power plant technology ranks last. Although it is one of the most promising sources of clean energy for the future, its extremely high costs, need for advanced technologies, and extensive infrastructure—currently unavailable in Iran—have placed it at the bottom of the list.

4. Conclusions

Electricity, as one of the most fundamental forms of energy, plays a pivotal role in supporting economic growth and enhancing quality of life. Given that electricity generation methods differ significantly in terms of technical, economic, environmental, and social aspects, their evaluation and prioritization represent a crucial step toward intelligent and sustainable planning in the energy sector. In this article, a range of conventional electricity generation technologies in Iran were examined, and a precise analysis was conducted using multi-criteria decision-making methods, particularly the integration of the Best-Worst Method (BWM) and VIKOR techniques, based on selected criteria. The analysis results indicate that combined-cycle, gas, and photovoltaic solar power plants hold the highest priorities, respectively. The combined-cycle plant, as the top priority, leverages dual turbine types and high efficiency, positioning it as an efficient and relatively low-cost option. Gas power plants also secure second place due to their rapid construction, operational flexibility, and low investment costs. Photovoltaic technology ranks third, relying on the renewable solar resource; although it faces challenges such as weather dependency, it plays a significant role in reducing emissions and diversifying the energy mix. Other electricity generation technologies follow in subsequent rankings. Based on these findings, it can be concluded that focusing on the development and deployment of the identified top technologies—particularly under Iran's climatic and economic conditions—can pave a more sustainable path for the country's energy supply and provide a solid foundation for future decision-making in the energy domain. As a continuation of this research, it is recommended that future studies incorporate various scenarios, such as stringent environmental scenarios or water scarcity conditions, and examine changes in rankings under these circumstances. Additionally, comparing the results of this study with other decision-making methods, such as AHP-TOPSIS, or integrating multi-criteria decision-making methods with optimization or simulation models, could enhance the precision and depth of the analyses.

Funding

This research received no external funding.

Author contributions

All authors have had equal roles and contributions to the article.

Conflicts of interest

There are no conflicts of interest associated with this research.

Acknowledgments

We are grateful to all colleagues who provided insights and expertise that greatly assisted this research. We also thank the anonymous reviewers for their valuable suggestions to improve the paper.

References

Abdolahinia, H., Heidarizadeh, M., & Rahmati, I. (2024). Assessing Iran and its neighbors for prospects and challenges: The case of the electrical sector. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 193, 114190. https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114190

Opricovic, S. (1998). *Multicriteria Optimization of Civil Engineering Systems. Belgrade: sn, Faculty of Civil Engineering*. https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.88184.

Rezaei, J. (2015). Best-worst multi-criteria decision-making method. *Omega*, 53, 49–57. https://doi.org/10.1016/j.omega.2014.11.009.

U.S. Energy Information Administration. (2024, October). Country Analysis Brief: Iran. U.S.

Department of Energy. https://www.eia.gov/international/content/analysis/countries_long/Iran/pdf/Iran%20CAB%202024.pdf

World Bank. (2024). Energy overview. https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024

مهندسی سیستم و بهره‌وری/ سال ۱۴۰۴/ دوره ۵/ شماره ۳/ صفحه ۱۷۹-۱۹۸

نشریه مهندسی سیستم و بهره‌وری

DOI: 10.22034/sep.2025.2063697.1333

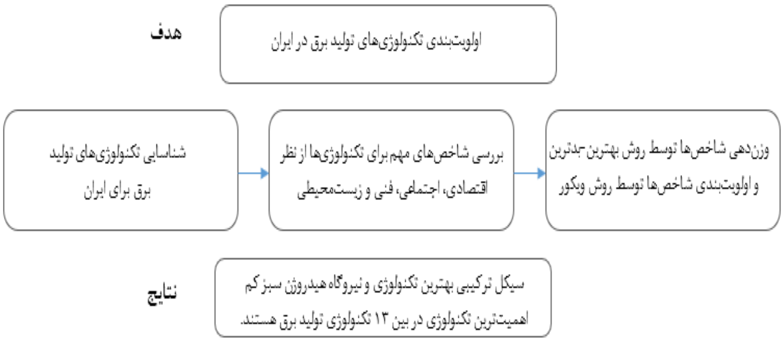
ارزیابی و اولویت‌بندی تکنولوژی‌های تولید برق در ایران با استفاده از رویکرد تصمیم‌گیری چندشاخصه

مونا عوض‌پور [1]، جواد زارعی [2]*، اسماعیل علی‌نژاد [2]

[1] کارشناسی، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

[2] استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

چکیده گرافیکی



برجسته‌ها

- اولویت‌بندی ۱۳ تکنولوژی تولید برق بوسیله روش تصمیم‌گیری چندمعیاره.
- ارزیابی و شناسایی شاخص‌های اقتصادی، زیست‌محیطی، اجتماعی و فنی.
- وزن‌دهی شاخص‌ها با استفاده از روش بهترین-بدترین و رتبه‌بندی فناوری‌های تولید برق با استفاده از روش ویکور.
- انتخاب سیکل ترکیبی به عنوان بهترین فناوری و نیروگاه هیدروژن سبز به عنوان کم اهمیت‌ترین تکنولوژی.

چکیده

انرژی از ارکان اصلی توسعه اقتصادی و اجتماعی جوامع به شمار می‌رود و نقشی اساسی در حوزه‌هایی مانند صنعت، حمل‌ونقل، کشاورزی و زندگی روزمره ایفا می‌کند. در این میان، برق به‌عنوان یکی از مهم‌ترین اشکال انرژی، جایگاه ویژه‌ای یافته و افزایش تقاضا برای آن، اهمیت انتخاب روش‌های مناسب تولید برق را بیشتر کرده است. روش‌های متعددی برای تولید برق وجود دارد، مانند نیروگاه‌های گازی، سیکل ترکیبی، زغال‌سنگ، هسته‌ای، خورشیدی، بادی، آبی، زمین‌گرمایی و ... که هرکدام ویژگی‌ها و پیامدهای متفاوتی دارند. با توجه به تفاوت‌های موجود در عملکرد، هزینه، اثرات زیست‌محیطی و ابعاد اجتماعی این روش‌ها، اولویت‌بندی تکنولوژی‌های تولید برق، گامی مهم در جهت دستیابی به توسعه پایدار و تصمیم‌گیری بهینه در بخش انرژی است. هدف این مقاله، شناسایی و اولویت‌بندی تکنولوژی‌های تولید برق با استفاده از معیارهای کیفی و کمی در کشور ایران است؛ بنابراین، ابتدا تکنولوژی‌های تولید برق شناسایی‌شده و مقادیر شاخص‌های زیست‌محیطی، اجتماعی، اقتصادی و فنی مانند میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای، هزینه تمام‌شده به ازای هر کیلووات ساعت برق، سرمایه‌گذاری اولیه، میزان اشتغال و ... برای هرکدام از تکنولوژی‌ها استخراج می‌شود. درنهایت، با استفاده از روش بهترین-بدترین، وزن شاخص‌ها تعیین و با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره ویکور، تکنولوژی‌های تولید برق اولویت‌بندی می‌شوند. نتایج نشان می‌دهند که سیکل ترکیبی بهترین تکنولوژی و نیروگاه هیدروژن سبز کم‌اهمیت‌ترین تکنولوژی در بین ۱۳ تکنولوژی تولید برق هستند.

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۲۴

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۱۱

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۲۲

ارائه برخط: ۱۴۰۴/۰۴/۲۲

*نویسنده مسئول:

j.zarei@sutech.ac.ir

کلیدواژه‌ها:

انرژی

تکنولوژی‌های تولید برق

تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM)

روش بهترین-بدترین (BWM)

روش ویکور

۱- مقدمه

انرژی یکی از اساسی‌ترین نیازهای جوامع امروزی است و نقشی محوری در رشد اقتصادی، اجتماعی و صنعتی ایفا می‌کند. از زمان انقلاب صنعتی، اهمیت انرژی افزایش یافته است و اکنون به‌عنوان موتور محرک توسعه در نظر گرفته می‌شود (World Bank Energy overview, 2024). دسترسی به انرژی قابل‌اعتماد و مقرون‌به‌صرفه برای نیرو بخشیدن به صنایع، حمل‌ونقل، مراقبت‌های بهداشتی و خانوارها ضروری است. بااین‌حال، طبق گزارش بانک جهانی، هنوز نزدیک به ۷۰۰ میلیون نفر در سراسر جهان بدون برق زندگی می‌کنند و حدود ۲/۳ میلیارد نفر برای پختن وعده‌های غذایی خود به سوخت‌های آلاینده و فناوری‌های سنتی متکی هستند که این امر نیاز حیاتی به زیرساخت‌های انرژی گسترده را برجسته می‌کند. تولید الکتریسیته نقشی محوری در تأمین نیازهای انرژی جهان ایفا می‌کند. آژانس بین‌المللی انرژی پیش‌بینی می‌کند که تولید برق جهانی تا سال ۲۰۵۰ نسبت به سال ۲۰۲۲ بین ۳۰ تا ۷۶ درصد افزایش خواهد یافت و انتظار می‌رود فناوری‌های کربن صفر بخش عمده‌ای از این رشد را به خود اختصاص دهند (International Energy Outlook, 2023). ایران یکی از کشورهای پیشرو در تولید و مصرف انرژی در منطقه خاورمیانه می‌باشد که با منابع عظیم نفت و گاز طبیعی که دارد، بخش عمده‌ای از نیازهای انرژی خود را تأمین می‌کند (U.S. Energy Information Administration, 2024). ایران در سال ۲۰۲۲ حدود ۳۶۰/۷ تراوات ساعت برق تولید کرده است که عمده آن از منابع مختلف تأمین‌شده است و سهم گاز طبیعی در این تولید ۸۵/۲ درصد، نفت ۸/۱ درصد، انرژی هسته‌ای ۱/۷ درصد، انرژی آبی ۴/۴ درصد و سایر منابع تجدیدپذیر ۰/۴ درصد بوده است؛ بنابراین گاز طبیعی و نفت تقریباً تمام مصرف انرژی اولیه را تشکیل داده‌اند، درحالی‌که سهم منابع دیگر مانند انرژی آبی، زغال‌سنگ، هسته‌ای و تجدیدپذیرها بسیار کم بوده است. همچنین در زمینه مصرف انرژی، ایران در سال ۲۰۲۲ حدود ۱۳/۵ کوادریلیون واحد حرارتی بریتانیایی انرژی مصرف کرده است که بالاترین میزان مصرف انرژی در خاورمیانه بوده است. چالش‌های پیش روی ایران در حوزه انرژی شامل تحریم‌های بین‌المللی و وابستگی شدید به منابع فسیلی است که تحریم‌ها تأثیر زیادی بر سرمایه‌گذاری‌های خارجی و توسعه زیرساخت‌های انرژی داشته و فشارهای اقتصادی ناشی از آن باعث کاهش سرعت انجام پروژه‌های انرژی شده است. علاوه بر این، وابستگی زیاد به گاز طبیعی و نفت می‌تواند مشکلات زیست‌محیطی و اقتصادی ایجاد کند. در نتیجه توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر به دلیل ظرفیت بالای ایران در زمینه انرژی خورشیدی و بادی می‌تواند وابستگی به منابع فسیلی را کاهش دهد. با توجه به رشد فزاینده مصرف برق در ایران و ضرورت احداث نیروگاه‌های جدید، اولویت‌بندی فناوری‌های تولید برق بر اساس معیارهای چندبعدی به یکی از چالش‌های کلیدی سیاست‌گذاران تبدیل‌شده است. اهمیت این موضوع در چند محور اصلی قابل‌بررسی است. ابتدا ازلحاظ تنوع‌بخشی به سبد انرژی، زیرا ایران وابستگی بیش‌ازحد به سوخت‌های فسیلی دارد که چالش‌های زیست‌محیطی ناشی از آن، نیاز به ارزیابی جامع فناوری‌های جایگزین را ضروری کرده است. همچنین، تصمیم‌گیری صرفاً بر اساس معیارهای اقتصادی بدون در نظر گرفتن ابعاد فنی، اجتماعی و زیست‌محیطی می‌تواند به انتخاب‌های ناپایدار منجر شود. در نهایت حرکت بین‌المللی به سمت انرژی‌های تجدیدپذیر و الزامات کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، بازنگری در اولویت‌بندی نیروگاه‌ها را اجتناب‌ناپذیر کرده است. در مقایسه با سایر مطالعات که عمدتاً بر جنبه‌های محدودی از فناوری‌ها تمرکز دارند، این مقاله با ارائه چارچوبی نظام‌مند مبتنی بر روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و در نظر گرفتن ۱۷ شاخص کلیدی در چهار گروه فنی، اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی برای اولویت‌بندی ۱۳ فناوری تولید برق شامل تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر، تحلیل جامع‌تر و کارآمدتری برای تصمیم‌گیران فراهم می‌کند. این رویکرد می‌تواند مسیر توسعه صنعت برق ایران را با نیازهای آینده شامل افزایش تقاضا، چالش‌های زیست‌محیطی و الزامات فناورانه همسو سازد و به تصمیم‌گیری بهتر برای سرمایه‌گذاری در پروژه‌های انرژی کمک کند. در ادامه، به‌منظور تبیین بهتر مسئله و بررسی پیشینه‌های مرتبط، مروری بر ادبیات موضوع ارائه می‌گردد.

۲- ادبیات موضوع

در سال‌های اخیر، افزایش تقاضای انرژی، محدودیت منابع فسیلی و نگرانی‌های زیست‌محیطی، کشورها را به‌سوی

بررسی، ارزیابی و انتخاب بهینه تکنولوژی‌های تولید برق سوق داده است (Si et al., 2016). انتخاب تکنولوژی مناسب برای تولید برق، یکی از تصمیمات استراتژیک در حوزه برنامه‌ریزی انرژی است که ابعاد مختلفی همچون اقتصادی، فنی، زیست‌محیطی، اجتماعی و سیاسی را در برمی‌گیرد. ازآنجاکه این تصمیم‌گیری تحت تأثیر معیارهای گوناگون و گاه متضاد قرار دارد، بهره‌گیری از روش‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه به‌عنوان ابزارهایی کارآمد در تحلیل این پیچیدگی‌ها بسیار موردتوجه پژوهشگران قرارگرفته است. با توجه به رشد سریع جمعیت و توسعه اقتصادی در ایران و کشورهای همسایه، تقاضا برای برق در این منطقه به‌طور چشمگیری افزایش‌یافته است. برای پاسخگویی به این نیاز فزاینده، تولید گسترده برق از طریق نیروگاه‌های فسیلی، انرژی‌های تجدیدپذیر و اتصال شبکه‌ها با کشورهای همسایه ضروری است (Abdolahinia et al., 2024). ایران نقش کلیدی در توسعه ظرفیت برق، پروژه‌های اتصال فرامرزی و برنامه‌ریزی برای جایگزینی سوخت‌های فسیلی با منابع پایدار ایفا می‌کند؛ بنابراین، برق نه‌تنها زیرساخت حیاتی برای توسعه کشور محسوب می‌شود، بلکه ابزاری راهبردی برای همکاری منطقه‌ای و امنیت انرژی آینده به شمار می‌آید. ایران با برخورداری از تنوع جغرافیایی، منابع غنی انرژی و زیرساخت‌های فنی، ظرفیت آن را دارد که میزبان انواع فناوری‌های تولید برق باشد. اقلیم متنوع کشور (Yazdi et al., 2025)، امکان بهره‌برداری از انرژی‌های خورشیدی، بادی، آبی و زمین‌گرمایی را فراهم کرده است. وجود منابع گسترده نفت و گاز، توسعه نیروگاه‌های حرارتی و سیکل ترکیبی را تسهیل می‌کند. همچنین، پتانسیل احداث نیروگاه‌های هسته‌ای با پشتوانه علمی و فنی کشور وجود دارد. از منظر اقتصادی، ایران توان تأمین داخلی و حتی صادرات انرژی را داراست. تحقق این ظرفیت‌ها نیازمند سیاست‌گذاری هوشمند، سرمایه‌گذاری مؤثر و انتقال فناوری‌های روز است. بسیاری از مطالعات به بررسی، ارزیابی و مقایسه تکنولوژی‌های انرژی تجدیدپذیر پرداخته‌اند. این مقالات با هدف شناسایی ظرفیت‌ها، چالش‌ها و مزایای هر یک از منابع تجدیدپذیر همچون انرژی خورشیدی، بادی، زیست‌توده، زمین‌گرمایی و برق‌آبی انجام‌شده‌اند. اغلب این پژوهش‌ها از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره برای تحلیل عملکرد گزینه‌های مختلف استفاده کرده‌اند و معیارهایی مانند هزینه، پایداری زیست‌محیطی، در دسترس بودن منابع و پشتیبانی سیاستی را در نظر گرفته‌اند. یک تحلیل جامع از روش‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه در سال ۲۰۲۴ برای انتخاب منابع انرژی تجدیدپذیر توسط رحمان و همکاران انجام شد. عباسیان و نهاوندی (Abbasian & Nahavandi, 2022) توسعه پایدار در انتخاب توربین بادی برای یک مزرعه بادی ایران را موردبررسی قرار دادند و از روش‌های تحلیل سلسله‌مراتبی و تاپسیس و سلسله‌مراتب توصیفی-میدانی استفاده کردند. معیارهایی که انتخاب کردند شامل: مشخصات و مختصات فنی، سازنده (تأمین‌کننده)، زمینه‌های فرصت‌ساز، مولّدهای هزینه و ریسک‌ها بود که البته به تعداد ۳۱ زیرمعیار شناسایی و دسته‌بندی شدند. بر اساس نتایج، شرکت بین‌المللی Sinovel Wind به‌عنوان برترین گزینه معرفی شد. با وجود مطالعات متعدد در زمینه انرژی‌های تجدیدپذیر، بسیاری از این پژوهش‌ها صرفاً بر یک نوع تکنولوژی مانند نیروگاه‌های بادی یا خورشیدی متمرکز بوده‌اند و به بررسی جامع سایر گزینه‌های موجود نپرداخته‌اند. درحالی‌که انتخاب بهینه در حوزه تولید برق نیازمند رویکردی کل‌نگر است که طیف وسیعی از تکنولوژی‌ها را به‌صورت هم‌زمان و مقایسه‌ای در نظر بگیرد. خزایی و همکاران انواع انرژی‌های تجدیدپذیر تولید برق در ایران را بررسی کردند (Khazaee et al., 2022). نتایج نشان می‌دهد که طی ۲۰ سال گذشته ۱/۵ درصد از میزان برق تولیدی ایران از انرژی‌های تجدیدپذیر تأمین می‌شود همچنین تا سال ۲۰۲۰، ایران دارای ظرفیت ۴۲۰۰۰ مگاواتی استفاده از این انرژی‌ها است؛ اما ظرفیت نیروگاه‌های تجدیدپذیر احداث‌شده در ایران ۸۰۰ مگاوات است. مناطق مختلف ایران ظرفیت بادی، خورشیدی و زمین‌گرمایی بالایی دارند که برای تأمین نیازهای برق به‌اندازه کافی استفاده‌نشده است. رضایی برای اولویت‌بندی تکنولوژی‌های تجدیدپذیر معیارهایی مانند فنی، اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی را انتخاب کرد و در ادامه از روش‌های تحلیل سلسله مراتبی و ترکیبی استفاده کرد (Rezaei, 2022). نتایج نشان می‌دهد انرژی خورشیدی دارای بالاترین اولویت است و معیار اقتصادی برای تصمیم‌گیری بسیار مؤثر است. بر اساس مطالعه مروری کاماری و همکاران در سال ۲۰۲۰، معیارهای فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی برای تصمیم‌گیری در توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر استفاده شد که در ادامه معیارهای دیگری مانند

اجتماعی و ریسک را برای دستیابی به قابلیت اطمینان بیشتر در نظر گرفتند و از روش‌های ترکیبی و مجموعه‌های فازی به‌جای مجموعه‌های قطعی برای بهبود عملکرد روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و کاهش آن عدم قطعیت‌ها استفاده نمودند (Lak Kamari et al., 2020). لنارچیک و همکاران فناوری‌هایی که با استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر شانس توسعه برق در لهستان را دارند، بررسی کردند و برای تعیین وزن از روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی استفاده کردند (Lenarczyk et al., 2022). نتایج نشان داد مزارع بادی فراساحلی، بیشترین امتیاز را کسب کرد. سپس فتوولتائیک در رتبه دوم و بیوگاز و نیروگاه‌های زیست‌توده به ترتیب رتبه یکسانی را در رتبه‌بندی دریافت کردند و در آخر انرژی آبی و زمین‌گرمایی پایین‌ترین فناوری‌ها بودند. سدادی و بهشتی‌نیا به شناسایی معیارهای کیفی و کمی برای احداث نیروگاه‌هایی با منابع تجدیدپذیر از منظر اقتصادی، زیست‌محیطی، اجتماعی و فنی پرداختند. سپس با ترکیبی از ابزارهای منطق دیجیتال بهبودیافته و ویکور فازی، روشی برای وزن‌دهی معیارها انتخاب کردند (Beheshtinia & Sedadi, 2022). نتایج نشان داد که اولویت احداث با توجه به معیارهای تعیین‌شده، به ترتیب با نیروگاه‌های برق‌آبی، زمین‌گرمایی، بادی، زیست‌توده و فتوولتاییک است. مهدی و همکاران در مورد کشور ایران و انرژی‌های تجدیدپذیر با توجه به معیارهای استراتژیک مانند تکنولوژی، اقتصاد، اثرات زیست‌محیطی، سیاست و اجتماعی پژوهشی انجام دادند (Mahdi et al., 2022). نتایج این پژوهش انرژی خورشیدی را در صدر گزینه‌های انرژی و پس‌ازآن با اختلاف بسیار ناچیزی به ترتیب منابع انرژی برق‌آبی، زیست‌توده، انرژی بادی و در آخر منبع زمین‌گرمایی را اولویت‌بندی کردند. مطالعات اخیر تمرکز خود را صرفاً بر تکنولوژی‌های تجدیدپذیر معطوف کرده‌اند، درحالی‌که برای دستیابی به یک سیاست انرژی پایدار و واقع‌بینانه، بررسی هم‌زمان منابع تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر امری ضروری است. امیری و همکاران در سال ۱۴۰۲ به‌منظور شناسایی عوامل مؤثر بر تکنولوژی‌های تولید برق با رویکرد عدم قطعیت انرژی از روش فرایند تحلیل شبکه فازی استفاده کردند (Amiri et al., 2023). نتایج نشان‌دهنده آن است که شاخص سوخت‌های فسیلی بیشترین نزدیکی را به جواب ایده‌آل مثبت و بیشترین فاصله را از جواب ایده‌آل منفی دارا است و اولویت نخست تکنولوژی‌های تولید برق است. درنتیجه سرمایه‌گذاری بر روی سوخت‌های فسیلی می‌تواند بالاترین مطلوبیت را ازنظر شاخص‌های تعریف‌شده کسب کند. زنگنه و همکاران معیارهای اقتصادی، فنی و زیست‌محیطی را انتخاب کردند. همچنین، از روش تصمیم‌گیری سلسله مراتبی پیشنهادی استفاده کردند. نتایج نشان داد (Zangeneh et al., 2009) که توربین‌های گازی تقریباً بهترین فناوری برای سرمایه‌گذاری در مناطق مختلف ایران هستند. ایجابی و همکاران برای افق ۱۴۰۴ از روش تحلیل سلسله مراتبی و تکنیک تصمیم‌گیری تاپسیس انواع انرژی موجود در ایران را با هدف افزایش امنیت انرژی و با توجه به چهار معیار اصلی شامل فراهم بودن، در دسترس بودن، قابل‌خرید بودن و قابل‌قبول بودن را ارزیابی و اولویت‌بندی کردند (Ijabi et al., 2019). نتایج نشان داد که گاز طبیعی به‌عنوان مناسب‌ترین نوع انرژی در راستای تأمین امنیت انرژی مشخص‌شده و انرژی‌های تجدیدپذیر و هسته‌ای در اولویت‌های دوم و سوم هستند. قائد در سال ۱۳۹۷ یک ارزیابی درباره انتخاب تکنولوژی تولید انرژی الکتریکی و با تأکید بر اهداف اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی انجام داد (Ghaed, 2018). در ادامه از روش‌های تحلیل سلسله مراتبی فازی، آنتروپی شانون، ویکور، الگوی خود توضیح برداری، روش جوهانسن - جوسیلیوس و الگوی تصحیح خطا استفاده کرد. نتایج نشان داد که انرژی خورشیدی در رده اول قرار دارد و سپس به ترتیب انرژی‌های بادی، گاز، آبی، زمین‌گرمایی و زغال‌سنگ در رده‌های دوم تا ششم انرژی‌ها قرار گرفتند. برخلاف بسیاری از مطالعات پیشین که تمرکز محدودی بر سه یا چهار تکنولوژی خاص تولید برق داشتند، استرایمکن و همکاران در پژوهش خود دامنه تکنولوژی‌های موردبررسی را گسترش داد (Streimikiene et al., 2012) و مجموعه‌ای متنوع از منابع انرژی، اعم از تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر را به‌صورت مقایسه‌ای تحلیل کرد. مرکز آن‌ها بر تغییر ترکیب انرژی در پی تحولات اقتصادی، فناوری، اجتماعی و سیاسی بوده است. در این راستا، آن‌ها چارچوب پشتیبانی تصمیم چندمعیاره‌ای برای انتخاب پایدارترین فناوری‌های تولید برق ارائه داده و از روش‌های مولتی‌مورا و تاپسیس برای تحلیل معیارهای متناقض بهره برده‌اند.

نتایج این پژوهش سیاست انرژی آینده را به سمت فناوری‌های پایدار مانند آب و حرارتی خورشیدی سوق می‌دهد. استین در سال ۲۰۱۳ مدلی برای رتبه‌بندی فناوری‌های تولید برق از منابع تجدیدپذیر و غیرتجدیدپذیر با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی و بر اساس چهار معیار فنی، زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی ارائه داد (Stein, 2013). این مدل نشان می‌دهد که باد، خورشید، آب و زمین‌گرمایی مزایای بیشتری نسبت به سایر منابع دارند، درحالی‌که از میان منابع غیرتجدیدپذیر، تنها گاز و نفت در برخی رتبه‌های برتر قرارگرفته‌اند. نتایج این تحقیق پیشنهاد می‌کند که مشوق‌های مالی برای انرژی‌های تجدیدپذیر افزایش یابد. پروانه و حماد سال ۲۰۲۴ در حوزه پایداری پروژه‌های ساخت‌وساز نیروگاهی، شانزده معیار در دسته‌بندی‌های اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی و فنی را موردبررسی قرار دادند (Parvaneh & Hammad, 2024). نتایج نشان داد که گاز طبیعی با جذب کربن برای پایداری مطلوب است. منظور و رحیمی معیارهای اقتصادی، زیست‌محیطی، سیاسی، اجتماعی، امنیت انرژی و فنی را برای اولویت‌بندی فناوری‌های برق موردبررسی قرار دادند و برای وزن‌دهی معیارهای کیفی از روش تحلیل سلسله مراتبی و برای معیارهای کمی از روش پرومته استفاده کردند (Manzoor & Rahimi, 2022). نتایج نشان داد نیروگاه‌های بادی بالاترین امتیاز را کسب کرده و به ترتیب برق‌آبی، فتوولتائیک، سیکل ترکیبی، هسته‌ای، گازی و بخاری در اولویت‌های دوم تا هفتم طبق امتیاز کسب‌شده قرار گرفتند. اگرچه روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره در بسیاری از مطالعات برای ارزیابی و اولویت‌بندی تکنولوژی‌های تولید برق مورداستفاده قرارگرفته‌اند، اما برخی پژوهش‌ها رویکردهای جایگزین را نیز به کار گرفته‌اند. کاظمی و همکاران (Kazemi et al., 2020) در سال ۱۳۹۰ با محاسبه هزینه انرژی خروجی و هزینه واحد انرژی تولیدی، به مقایسه قیمت‌های تمام‌شده برق تولیدی توسط نیروگاه‌های مختلف سیکل ترکیبی، بادی و فتوولتاییک پرداختند و از روش تحلیل پوششی داده‌ها برای ارزیابی و مقایسه فناوری‌های تولید برق استفاده کردند. نتایج نشان داد هزینه تمام‌شده تولید برق از سوخت‌های فسیلی، از نیروگاه‌های تجدیدپذیر بیشتر است و تکنولوژی‌های تجدیدپذیر بیشترین انطباق را با معیارهای پایداری دارند. مطلق و همکاران در سال ۲۰۲۲ کارآمدترین سیاست را برای بهبود بهره‌وری اقتصادی و زیست‌محیطی بخش برق حرارتی در قالب بهترین سناریو از طریق تحلیل هزینه و فایده شناسایی کردند (Motlagh et al., 2022). نتایج نشان داد که تمامی سناریوهای جایگزین با کاهش بیش از ۱۵ درصدی انتشار گازهای گلخانه‌ای همراه است. هر یک از معیارهای اصلی مانند اقتصادی، زیست‌محیطی، فنی یا اجتماعی، تحت تأثیر مجموعه‌ای از شاخص‌های جزئی‌تری قرار دارند که در برخی پژوهش‌ها موردتوجه قرارگرفته‌اند. مقاله‌ای با استفاده از مدل‌سازی معادلات ساختاری و آزمون فریدمن، به شناسایی و اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر بهره‌وری منابع انسانی در سازمان‌های پژوهشی پرداخته است (Ershadi et al., 2024). نتایج نشان می‌دهد عوامل سازمانی بیشترین تأثیر را دارند. استفاده از رویکرد تصمیم‌گیری چند شاخصه در این مطالعه، الگویی مناسب برای ارزیابی و اولویت‌بندی در حوزه‌های مشابه ازجمله تکنولوژی‌های تولید برق ارائه می‌دهد. هیچ یک از مقالات به‌خوبی معیارهای مؤثر ارزیابی تکنولوژی‌های تولید برق که در جدول **۱** آمده است را به‌طور جامع و کامل موردبررسی قرار نداده‌اند. این امر موجب شده پیامدهای مهمی مانند عدم دقت کافی در اولویت‌بندی فناوری‌ها و اتخاذ تصمیمات ناپایدار در سیاست‌گذاری انرژی به وجود آید. همچنین، بیشتر مطالعات تکنولوژی‌های جدید و نوظهوری مانند هیدروژن سبز را در نظر نگرفته‌اند. تکنولوژی تولید سبز، به‌ویژه هیدروژن سبز، راهکاری مهم (Squadrito et al., 2023) برای تأمین انرژی پاک در آینده است. باوجود پیشرفت‌ها، چالش‌هایی مانند هزینه بالا و بحران آب مانع گسترش آن شده‌اند. روش‌هایی مثل الکترولیز آب بسیار امیدوارکننده‌اند. برای تسریع این گذار، توجه به تکنولوژی‌های نوین و شرایط اقتصادی و زیست‌محیطی ضروری است. یکی از شکاف‌های تحقیقاتی مهم در حوزه اولویت‌بندی تکنولوژی‌های تولید برق، محدود کردن شاخص‌های در نظر گرفته‌شده به معیارهای اقتصادی یا زیست‌محیطی است. در این مقاله، برخلاف مطالعات پیشین، رویکردی جامع‌تر اتخاذ می‌شود و ارزیابی بر اساس ۱۷ معیار کلیدی در چهار دسته زیست‌محیطی، فنی، اقتصادی و اجتماعی انجام می‌شود. در نظر گرفتن معیارهای بیشتر و کامل‌تر باعث می‌شود نتایج دقیق‌تری به دست آید. همچنین، معیارهای به‌کاررفته نه‌تنها از تنوع

بالایی برخوردارند، بلکه ازلحاظ جزئیات نیز نسبت به مطالعات پیشین دقیق‌تر و جامع‌تر انتخاب‌شده‌اند. جدول **۱** مقایسه‌ای دقیق میان تکنولوژی‌های بررسی‌شده در این مقاله با سایر مطالعات پیشین ارائه و تفاوت‌ها و نوآوری‌های این تحقیق را به‌خوبی نشان می‌دهد. جدول **۲**، خلاصه‌ای از ادبیات موضوع را ارائه می‌دهد که شامل شاخص‌های مورداستفاده در مقالات و روش حل آن‌ها است. تفاوت دیگری که این پژوهش با مطالعات پیشین دارد، این است که بسیاری از مطالعات تنها به تکنولوژی‌های منتخب یا خاصی از تولید برق پرداخته‌اند. درحالی‌که برای نخستین بار، ۱۳ فناوری کلیدی تولید برق شامل نیروگاه‌های سوخت فسیلی (زغال‌سنگ، نفت، گاز طبیعی و هسته‌ای)، تجدیدپذیر (خورشیدی، بادی، زمین‌گرمایی، زیست‌توده) و نوظهور (هیدروژن سبز) در یک چارچوب منسجم مورد ارزیابی قرارگرفته‌اند. از منظر روش‌شناسی، این مقاله با بهره‌گیری از روش بهترین-بدترین برای تعیین وزن معیارها و روش ویکور برای رتبه‌بندی تکنولوژی‌ها، از چارچوبی نوین و دقیق در حوزه تصمیم‌گیری چندمعیاره استفاده می‌کند.

جدول ۱. تکنولوژی‌های موردبررسی در مقالات

Table 1. Technologies reviewed in the articles

رجع	شماره مرجع	تکنولوژی‌ها											
		سیکل ترکیبی	گازی	دیزلی	هسته‌ای	نفتی	زغال‌سنگ	هیدروژن سبز	زیست‌توده	زمین‌گرمایی	آبی	بادی	خورشیدی
Manzoor & Rahimi, 2015	۱	✓	✓		✓						✓	✓	✓
Ghaed, 2018	۲		✓				✓			✓	✓	✓	✓
Kazemi et al., 2020	۳	✓										✓	✓
Beheshtinia & Sedadi, 2022	۴								✓	✓	✓	✓	✓
Amiri et al., 2023	۵					✓	✓				✓	✓	✓
Abbasian & Nahavandi, 2022	۶											✓	
Mahdi et al.,	۷								✓	✓	✓	✓	✓
Lak Kamari et al., 2020	۸								✓		✓	✓	✓
Rezaei, 2022	۹								✓	✓	✓	✓	✓
Lenarczyk et al., 2022	۱۰								✓	✓	✓	✓	✓
Khazaee et al., 2022	۱۱									✓		✓	✓
Zangeneh et al., 2009	۱۲		✓	✓								✓	✓
Streimikiene et al., 2012	۱۳		✓		✓	✓	✓		✓		✓	✓	✓
Parvaneh & Hammad, 2024	۱۴		✓				✓					✓	✓
Stein, 2013	۱۵		✓		✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓
Ijabi et al., 2019	۱۶		✓		✓	✓	✓		✓		✓		

جدول ۲. مرور شاخص‌های در نظر گرفته‌شده در ادبیات موضوع

Table 2. Review of indicators considered in the literature

شماره مرجع، مکان	شاخص‌ها																	روش حل
	زیست‌محیطی				اجتماعی		اقتصادی			فنی								
	تولید زباله	میزان مصرف آب	مساحت موردنیاز	انتشار گازهای گلخانه‌ای	مقبولیت اجتماعی	توسعه محلی و مزیت اجتماعی	نیروی انسانی موردنیاز	دوره عمر مفید	نرخ بازده داخلی	هزینه سرمایه‌گذاری	هزینه‌های عملیاتی	سهولت دسترسی	قابلیت توسعه	دانش فنی	قابلیت اطمینان	ظرفیت تولید	کارایی	
۱، ایران			✓	✓	✓	✓	✓			✓		✓		✓				تحلیل سلسله‌مراتبی پرامته
۲، ایران		✓		✓	✓			✓		✓	✓							تحلیل سلسله‌مراتبی فازی ویکور
۳، ایران		✓	✓	✓			✓	✓		✓	✓						✓	روش تحلیل پوششی داده‌ها
۴، ایران			✓	✓		✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓				✓	ویکور فازی
۵، ایران				✓		✓				✓			✓	✓	✓			فرآیند تحلیل شبکه‌ای فازی
۷، ایران		✓		✓	✓		✓			✓	✓				✓			فرآیند تحلیل شبکه‌ای
۸، ایران	✓		✓	✓	✓		✓			✓	✓	✓		✓	✓			تحلیل سلسله‌مراتبی
۹، ایران			✓				✓			✓	✓	✓	✓		✓		✓	تحلیل سلسله‌مراتبی کوکوسو
۹، لهستان			✓								✓	✓				✓		تحلیل سلسله‌مراتبی
۱۲، ایران				✓						✓	✓		✓					تحلیل سلسله‌مراتبی
۱۴، کانادا	✓	✓			✓		✓	✓	✓						✓	✓		تحلیل سلسله‌مراتبی تاپسیس

روش بهترین-بدترین نسبت به روش‌های سنتی مانند روش تحلیل سلسله مراتبی، ضمن جدیدتر بودن، با کاهش تعداد مقایسات زوجی، افزایش سازگاری قضاوت‌ها و دقت در وزن‌دهی، موجب بهبود کیفیت نتایج می‌شود. از سوی دیگر، روش ویکور با تمرکز بر نزدیکی به راه‌حل ایده‌آل و تحلیل جبران‌ناپذیری نسبی میان معیارها، دیدی متوازن‌تر در رتبه‌بندی گزینه‌ها ارائه می‌دهد. ترکیب این دو روش نوین، موجب افزایش اعتبار، شفافیت و قابلیت اتکای نتایج نهایی شده و پژوهش حاضر را از بسیاری از مطالعات پیشین متمایز می‌سازد. درنهایت، این مطالعه با تمرکز بر شرایط خاص کشور ایران ازجمله ویژگی‌های اقلیمی، منابع انرژی، وضعیت اقتصادی و اولویت‌های اجتماعی تلاش می‌کند تا اولویت‌بندی تکنولوژی‌های تولید برق به‌گونه‌ای انجام گیرد که نتایج آن برای تصمیم‌گیری‌های ملی و منطقه‌ای قابل‌استفاده و اثربخش باشد. در ادامه ساختار کلی مقاله تشریح می‌شود تا نحوه به‌کارگیری معیارها، روش‌ها و تحلیل نتایج در چارچوبی منسجم و هدفمند برای اولویت‌بندی تکنولوژی‌های تولید برق به‌روشنی مشخص گردد.

۳- ساختار کلی

در این مقاله ۱۷ معیار در چهار دسته فنی، اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی بر اساس دو منبع اصلی زیر انتخاب‌شده‌اند:

۱) مرور سیستماتیک پیشینه پژوهش: در ابتدا مقالات معتبر بین‌المللی و ملی موجود در ادبیات

موضوع بررسی و معیارهای پرتکرار و مشترک به‌عنوان لیست اولیه معیارها استخراج شدند.

۲) نظرات خبرگان: پنلی متشکل از متخصصان در حوزه انرژی (شامل اعضای هیئت‌علمی دانشگاه‌ها و مدیران و متخصصان صنعتی) تشکیل و برای شناسایی و نهایی‌سازی معیارها طی دو مرحله با استفاده از روش دلفی اصلاح‌شده مورد مشورت قرار گرفتند. بدین‌صورت که لیست اولیه معیارها که با استفاده از مرور سیستماتیک پیشینه پژوهش استخراج‌شده‌اند به‌عنوان ورودی به این پنل ارائه‌شده است. سپس این لیست اولیه با توجه به شرایط خاص ایران (مانند تحریم‌ها، اقلیم خشک و نیاز به اشتغال‌زایی) با نظر جمعی خبرگان در پنل اصلاح و نهایی شده‌اند.

شاخص‌های کارایی، ظرفیت تولید، دانش فنی، ضریب سهولت دسترسی، قابلیت اطمینان و قابلیت توسعه به‌عنوان شاخص‌های فنی در نظر گرفته می‌شوند. استفاده از شاخص کارایی به دلیل نمایش میزان بهره‌وری و توانایی تولید تکنولوژی ضروری است. ضریب سهولت دسترسی به ارزیابی قابلیت تأمین منابع و مواد اولیه کمک می‌کند که برای تضمین پایداری تکنولوژی اهمیت دارد. شاخص ظرفیت تولید نشان‌دهنده توان بالقوه یک فناوری در تأمین تقاضای برق است. دانش فنی بیانگر میزان تخصص و زیرساخت‌های لازم برای بهره‌برداری و توسعه آن فناوری می‌باشد. اهمیت دانش فنی و اشتراک آن به‌عنوان عوامل کلیدی در ارتقای سرمایه انسانی تأکیدشده است (Torabi et al., 2025). قابلیت اطمینان برای ارزیابی میزان اعتماد به عملکرد مستمر تکنولوژی استفاده می‌شود؛ زیرا عملکرد پایدار تأثیر مستقیمی بر تأمین انرژی دارد. درنهایت، قابلیت توسعه به بررسی امکان ارتقا و گسترش تکنولوژی در آینده می‌پردازد که از منظر تطبیق با تغییرات و نیازهای آتی حیاتی است. شاخص‌های اقتصادی شامل هزینه عملیاتی متغیر، هزینه سرمایه‌گذاری ثابت، نرخ بازده داخلی و دوره عمر هستند. هزینه عملیاتی متغیر برای تحلیل هزینه‌های جاری اهمیت دارد؛ زیرا این هزینه‌ها به‌طور مستقیم بر اقتصادی بودن تکنولوژی تأثیر می‌گذارند. هزینه سرمایه‌گذاری ثابت برای بررسی میزان سرمایه اولیه موردنیاز جهت راه‌اندازی تکنولوژی ضروری است. نرخ بازده داخلی اهمیت زیادی در ارزیابی اقتصادی فناوری‌های تولید برق دارد، زیرا نشان‌دهنده سودآوری سرمایه‌گذاری است. دوره عمر مفید، مدت‌زمان عملکرد کارآمد تجهیزات را مشخص می‌کند که در ارزیابی پایداری مالی و فنی تکنولوژی اهمیت دارد. در دسته اجتماعی، شاخص‌های نیروی انسانی موردنیاز، توسعه محلی و مزیت اجتماعی و مقبولیت اجتماعی در نظر گرفته می‌شوند. نیروی انسانی موردنیاز در فناوری‌های تولید برق، برای بهره‌برداری، نگهداری، تعمیرات، نظارت بر عملکرد تجهیزات و تضمین ایمنی تأسیسات ضروری است و مستقیماً بر هزینه‌ها و اشتغال‌زایی تأثیر دارد. نیروی انسانی موردنیاز اهمیت زیادی دارد زیرا توسعه آن باعث افزایش رضایت شغلی و حس عدالت در کارکنان می‌شود که به‌نوبه خود کارایی و عملکرد آن‌ها را بالا می‌برد. توسعه محلی و مزیت اجتماعی به دلیل تأثیرگذاری تکنولوژی بر زیرساخت‌ها و توانمندسازی جوامع محلی و ارزیابی تأثیرات مثبت تکنولوژی بر رفاه عمومی اهمیت دارد (Kenshlow, H., & Hosseini, 2024). مقبولیت اجتماعی در فناوری‌های تولید برق اهمیت دارد زیرا تأثیر مستقیمی بر اجرای موفق پروژه‌ها، جذب سرمایه‌گذاری و کاهش موانع اجتماعی و زیست‌محیطی دارد. در گروه زیست‌محیطی، انتشار گازهای گلخانه‌ای، میزان کل مصرف آب، مساحت زمین موردنیاز و تولید زباله موردبررسی قرار می‌گیرند. انتشار گازهای گلخانه‌ای شاخصی برای اندازه‌گیری میزان دی‌اکسید کربن و سایر گازهای مضر است که تأثیر مستقیمی بر تغییرات اقلیمی دارد. میزان مصرف آب به دلیل اهمیت حفظ منابع آبی، شاخص مهمی است که شامل میزان آب موردنیاز هر تکنولوژی، تبخیر، خنک‌سازی و ... می‌باشد که دیگر به طبیعت بازنمی‌گردد. مساحت زمین موردنیاز هر تکنولوژی به دلیل تأثیر مستقیم بر هزینه‌های احداث، کارایی و پایداری سیستم حائز اهمیت است و نیاز به مدیریت بهینه زمین برای جلوگیری از تخریب محیط‌زیست ضروری است. تولید زباله شاخصی برای ارزیابی میزان پسماندهای تولیدی است که مدیریت صحیح آن‌ها برای کاهش اثرات زیست‌محیطی مهم می‌باشد. این شاخص‌ها به‌صورت جامع و هماهنگ، ابزاری برای ارزیابی و اولویت‌بندی تکنولوژی‌های تولید برق فراهم می‌کنند تا تصمیم‌گیرندگان بتوانند انتخاب‌های بهتری بر اساس نیازها و منابع موجود انجام دهند. در جدول **۳**، تمامی شاخص‌های مورداستفاده آورده شده‌اند. تکنولوژی‌های تولید برق موردبررسی نیز به دو دسته کلی تجدیدپذیر و تجدید ناپذیر

تقسیم می‌شوند که روش‌های تجدیدپذیر از منابع طبیعی و بی‌پایانی که به‌صورت طبیعی تجدید می‌شوند و همیشه در دسترس هستند استفاده می‌کند. مزیت اصلی این منابع کاهش آلایندگی و پایداری محیط‌زیست است. چون انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلودگی کمتری دارند. البته برخی از این منابع نیاز به زیرساخت‌های اولیه گران‌قیمت دارند و ممکن است به شرایط محیطی مانند شدت نور خورشید یا سرعت باد وابسته باشند. روش‌های تجدید ناپذیر از منابعی استفاده می‌کنند که محدود و قابل پایان هستند. استفاده از این منابع مانند نفت، زغال‌سنگ و گاز، معمولاً منجر به انتشار گازهای گلخانه‌ای، آلودگی هوا و آب و تولید زباله‌های خطرناک می‌شود. مزیت اصلی این منابع قدرت تولید انرژی زیاد و زیرساخت‌های موجود برای بهره‌برداری از آن‌ها می‌باشد. تکنولوژی‌های تجدیدپذیر موردبررسی در این مقاله شامل خورشیدی فتوولتائیک (PV)، حرارتی خورشیدی (CSP)، توربین بادی، آبی (هیدروالکتریک)، زیست‌توده (بیومس)، زمین‌گرمایی (ژئوترمال) و نیروگاه هیدروژن سبز می‌باشد. همچنین تکنولوژی‌های تجدید ناپذیر شامل زغال‌سنگ، نفتی، گاز طبیعی، هسته‌ای، دیزلی و سیکل ترکیبی می‌باشد. در ادامه، به بررسی و توضیح روش‌های رتبه‌بندی و وزن‌دهی انتخاب‌شده پرداخته می‌شود.

۳-۱- روش وزن‌دهی

روش‌های مختلفی برای وزن‌دهی در چارچوب تصمیم‌گیری چندمعیاره وجود دارد. برخی از مهم‌ترین این روش‌ها عبارت‌اند از روش تحلیل سلسله‌مراتبی، روش شبکه تحلیلی، روش مبتنی بر آنتروپی و روش‌های نوین مبتنی بر مدل‌های تصمیم‌گیری مانند بهترین-بدترین. هر یک از این روش‌ها مزایا و معایب خاص خود را دارند. برای مثال، در روش تحلیل سلسله مراتبی تعداد مقایسه‌های زوجی موردنیاز برای تعیین وزن معیارها نسبتاً زیاد است و به‌روزرسانی آن نیز دشوار محسوب می‌شود. روش بهترین-بدترین به دلیل نیاز به تعداد کمتری از مقایسه‌های زوجی و همچنین انسجام بالاتر در نتایج برای وزن‌دهی معیارهای تکنولوژی‌های برق در این مقاله مورداستفاده قرار می‌گیرد. رضایی به معرفی دو مدل مختلف برای این روش پرداخته است (Rezaei, 2015). به‌طوری‌که در سال ۲۰۱۵ یک مدل غیرخطی ارائه شد و در سال ۲۰۱۶ مدل خطی آن ارائه گردید که با سادگی در حل مسئله، کاربرد عملی را در تصمیم‌گیری‌های صنعتی و پژوهشی افزایش می‌دهد (Rezaei, 2016). وزن‌دهی معیارها توسط روش بهترین-بدترین از طریق مراحل زیر انجام می‌شود:

- **مرحله اول:** مجموعه‌ای از معیارها توسط یک تصمیم‌گیرنده تعیین می‌شود $\{c_1, c_2, ..., c_n\}$.
- **مرحله دوم:** بهترین معیار (بیشترین ارجحیت) و بدترین معیار (کمترین ارجحیت) انتخاب می‌شود.
- **مرحله سوم:** همه معیارها به‌صورت زوجی با بهترین معیار مقایسه می‌شوند. برای انجام این کار، تصمیم‌گیرنده بهترین معیار نسبت به سایر معیارها بر اساس مقیاس ۱ تا ۱۷ مشخص می‌کند که در آن ۱۷ نشان‌دهنده بالاترین اولویت و ۱ نشان‌دهنده کمترین اولویت است. نتایج حاصل از فرآیند مقایسه به به‌صورت بردار $A_B = (a_{B1}, a_{B2}, ..., a_{Bn})$ نشان داده می‌شود که در آن a_{Bj} نمایانگر ترجیح بهترین معیار نسبت به معیار j است.
- **مرحله چهارم:** رویکرد مشابه مرحله قبل نیز برای بدترین معیار انجام می‌شود. تصمیم‌گیرنده باید هر معیار را به‌صورت جداگانه با بدترین معیار مقایسه کند. نتایج به‌صورت بردار $A_W = (a_{1W}, a_{2W}, ..., a_{nB})^T$ نمایش داده می‌شود که در آن a_{jW} نمایانگر ترجیح معیار j نسبت به بدترین معیار W و $a_{WW} = 1$ است.
- **مرحله پنجم:** در این مرحله وزن معیارها به‌صورت $(W_1^*, W_2^*, ..., W_n^*)$ محاسبه می‌شود. برای هر یک جفت از $\frac{w_B}{w_j}$ و $\frac{w_j}{w_w}$، وزن بهینه باید این دو شرط را داشته باشد: $\frac{w_B}{w_j} = a_{Bj}$ و $\frac{w_j}{w_w} = a_{jw}$ (Rezaei, 2015). برای برآورده کردن این دو شرط باید حداکثر تفاوت‌های مطلق $\left|\frac{w_B}{w_j} - a_{Bj}\right|$ و $\left|\frac{w_j}{w_w} - a_{jw}\right|$ برای تمامی معیارها به حداقل برسد. بنابراین، روش بهترین-بدترین را می‌توان با در نظر گرفتن ویژگی غیرمنفی بودن و شرط مجموع وزن‌ها توسط یک مسئله، مدل‌سازی کرد. پس از به دست آوردن مقادیر بهینه، سطح سازگاری مقایسات محاسبه می‌شود و نسبت سازگاری روش بهترین-بدترین طبق معادله (۱) بر اساس ξ قابل‌بیان است.

جدول ۳. شاخص‌های مورداستفاده در پژوهش

Table 3. Indicators used in the research

نوع شاخص	نام شاخص	جنس (کیفی/کمی)	واحد اندازه‌گیری
فنی	کارایی	کمی	درصد
	ظرفیت تولید	کمی	MWh (actual) / MWh (nameplate)
	قابلیت اطمینان	کیفی	طیف لیکرت
	دانش فنی	کیفی	طیف لیکرت
	قابلیت توسعه	کیفی	طیف لیکرت
	سهولت دسترسی	کیفی	طیف لیکرت
اقتصادی	هزینه‌های عملیاتی (متغیر)	کمی	USD/MW/year
	هزینه سرمایه‌گذاری (ثابت)	کمی	USD/MW
	نرخ بازده داخلی	کمی	درصد
	دوره عمر مفید	کمی	سال
اجتماعی	نیروی انسانی موردنیاز	کمی	FTE per MW
	توسعه محلی و مزیت اجتماعی	کیفی	طیف لیکرت
	مقبولیت اجتماعی	کیفی	طیف لیکرت
زیست‌محیطی	انتشار گازهای گلخانه‌ای	کمی	g CO_2eq/MWh
	مساحت زمین موردنیاز	کمی	m^2/MW
	میزان مصرف آب	کمی	L/MWh
	تولید زباله	کمی	tons/MW/year

۳-۲- روش رتبه‌بندی

در حوزه تصمیم‌گیری چندمعیاره، روش‌های متعددی برای رتبه‌بندی گزینه‌ها وجود دارد. به‌عنوان‌مثال می‌توان به روش تاپسیس، پرومته، واسپاس، ویکور و سایر روش‌ها اشاره کرد. از میان روش‌های رتبه‌بندی، روش ویکور به دلیل توانایی آن در ارائه یک جواب سازشی برای مسائل پیچیده با معیارهای متضاد در این مقاله استفاده می‌شود. در مسائل انرژی که شاخص‌های اقتصادی، فنی، زیست‌محیطی و اجتماعی ممکن است به‌طور قابل‌توجهی از یکدیگر متفاوت باشند، روش ویکور با ترکیب برنامه‌ریزی توافقی، سعی می‌کند تا نزدیک‌ترین جواب به حالت ایده‌آل را برای هر معیار ارائه دهد. این ویژگی، به‌ویژه در مواجهه با تضادهای موجود بین شاخص‌های انتخاب‌شده، اهمیت ویژه‌ای دارد. روش ویکور در سال ۱۹۸۸ توسط اپریکوویک معرفی شد (Opricovic, 1988). در سال ۲۰۰۴ اپریکوویک به همراه تزنگ مدل توسعه‌یافته آن را ارائه دادند (Opricovic & Tzeng, 2004). این روش مبتنی بر برنامه‌ریزی توافقی در مسائل تصمیم‌گیری چندمعیاره عمل می‌کند و هدف آن ارائه یک راه‌حل سازشی است که به‌گونه‌ای نزدیک به جواب ایده‌آل هر معیار باشد. فرض کنید $A_1, A_2, \ldots, A_k, \ldots, A_m$ نشان‌دهنده آلترنتیوها یا گزینه‌های امکان‌پذیر باشد. نمره عملکرد گزینه A_k و معیار jام با f_{kj} نشان داده می‌شود. وزن (اهمیت نسبی) معیار jام با w_j است که n تعداد معیارها است و $j = 1,2,\ldots,n$. توسعه روش ویکور با فرم زیر از متریک L_p با توجه به معادله (۲) آغاز شد که $1 \le p \le \infty$ و $k = 1,2,\ldots,m$ ؛ وزن w_j از فرآیند تحلیل شبکه‌ای مشتق می‌شود.

$min_k L_k^p$ نشان‌دهنده کمترین شکاف ترکیبی و نزدیک‌ترین گزینه به سطح مطلوب است. علاوه بر این، زمانی که p کوچک است p=1 تأکید بر مطلوبیت گروهی است. برعکس، اگر p به سمت بی‌نهایت میل کند، حداکثر شکاف‌های فردی اهمیت بیشتری در بهبود اولیه در هر معیار پیدا می‌کنند. در نتیجه، $min_k S_k$ با توجه به معادله (۳) مطلوبیت گروهی را به حداکثر می‌رساند، درحالی‌که طبق معادله (۴) $min_k Q_k$ بر حداقل کردن بزرگ‌ترین شکاف‌های فردی تمرکز دارد. بر این اساس روش ویکور دارای چهار مرحله زیر است:

- **مرحله اول:** داده‌های مربوط به عملکرد هر گزینه جمع‌آوری‌شده و یک ماتریس تصمیم تشکیل می‌شود.
- **مرحله دوم:** برای حذف تفاوت‌های مقیاسی بین معیارها، ماتریس تصمیم نرمال‌سازی می‌شود.
- **مرحله سوم:** برای هر معیار، بهترین و بدترین عملکرد به‌عنوان حل‌های ایده‌آل مثبت و منفی مشخص می‌شوند.
- **مرحله چهارم:** فاصله هر گزینه نسبت به حل‌های ایده‌آل مثبت و منفی با استفاده از معیارهای تعیین‌شده محاسبه می‌شود.
- **مرحله پنجم:** با ترکیب فاصله‌های محاسبه‌شده، یک شاخص رضایت برای هر گزینه به دست می‌آید که نشان‌دهنده نزدیکی آن گزینه به حالت ایده‌آل است.
- **مرحله ششم:** بر اساس شاخص رضایت، گزینه‌ها ازنظر عملکرد کلی رتبه‌بندی شده و نزدیک‌ترین گزینه به حل ایده‌آل به‌عنوان بهترین انتخاب مطرح می‌شود.

$$Consistency\ Ratio = \frac{\xi^*}{Consistency\ index} \quad (۱)$$

$$L_k^p = \{\textstyle\sum_{j=1}^{n}[w_j(|f_j^* - f_{kj}|)/(|f_j^* - f_j^-|)]^p\}^{\frac{1}{p}} \quad (۲)$$

$$S_K = L_K{}^{p=1} = \sum_{j=1}^{n}[w_j(|f_j^* - f_{kj}|)/(|f_j^* - f_j^-|)] \quad (۳)$$

$$Q_k = L_k{}^{p=\infty} = max_j\{(|f_j^* - f_{kj}|)/(|f_j^* - f_j^-|)\} \quad (۴)$$

۴- مطالعه موردی

در این مطالعه، کشور ایران به‌عنوان بستر تحقیق انتخاب می‌شود و ۱۷ شاخص کلیدی برای ارزیابی عملکرد ۱۳ فناوری مختلف تولید برق در نظر گرفته می‌شود. داده‌های مربوط به‌تمامی فناوری‌ها جمع‌آوری می‌گردد و برای وزن‌دهی شاخص‌ها، از روش بهترین-بدترین استفاده می‌شود. ابتدا این ۱۷ شاخص در چهار دسته اصلی شامل فنی، اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی تقسیم می‌شوند. در گام نخست، به هر دسته با استفاده از طیف لیکرت ۱ تا ۵ وزن‌دهی انجام می‌گیرد. به‌گونه‌ای که با استفاده از نظرات خبرگان، شاخص فنی مهم‌ترین و شاخص اجتماعی کم‌اهمیت‌ترین دسته در نظر گرفته می‌شوند. سپس، در هر دسته، بهترین و بدترین شاخص‌ها با استفاده از طیف لیکرت ۱ تا ۵ وزن‌دهی می‌شوند. در دسته فنی، «سهولت دسترسی» به‌عنوان مهم‌ترین شاخص و «قابلیت توسعه» به‌عنوان کم‌اهمیت‌ترین شاخص انتخاب می‌شوند. در دسته اقتصادی، «هزینه سرمایه‌گذاری» به‌عنوان مهم‌ترین و «دوره عمر مفید» به‌عنوان ضعیف‌ترین شاخص انتخاب گردید. در دسته زیست‌محیطی، «انتشار گاز گلخانه‌ای» بهترین و «مساحت زمین موردنیاز» ضعیف‌ترین شاخص شناخته شد. درنهایت، در دسته اجتماعی، «مقبولیت اجتماعی» مهم‌ترین و «توسعه محلی و مزیت اجتماعی» کم‌اهمیت‌ترین شاخص تعیین گردید. جدول ۴ وزن نهایی هر یک از شاخص‌ها را ارائه می‌دهد.

جدول ۴. وزن نهایی ۱۷ معیار با استفاده از روش بهترین-بدترین

Table 4. Final weights of 17 criteria using the best-worst method

شاخص‌ها	وزن معیارها
سهولت دسترسی	۰/۱۶۹۷
مقبولیت اجتماعی	۰/۰۴۷۰
نیروی انسانی موردنیاز	۰/۰۲۳۵
دانش فنی	۰/۰۹۶۶
ظرفیت تولید	۰/۰۶۴۴
کارایی	۰/۰۶۴۴
هزینه سرمایه‌گذاری	۰/۱۲۶۲
هزینه‌های عملیاتی	۰/۰۷۱۴
قابلیت اطمینان	۰/۰۴۸۳
انتشار گازهای گلخانه‌ای	۰/۰۸۸۱
میزان مصرف آب	۰/۰۴۹۸
نرخ بازده داخلی	۰/۰۴۷۶
قابلیت توسعه	۰/۰۲۹۳
توسعه محلی و مزیت اجتماعی	۰/۰۱۱۷
تولید زباله	۰/۰۲۴۹
دوره عمر مفید	۰/۰۲۲۰
مساحت زمین موردنیاز	۰/۰۱۵۳

برای رتبه‌بندی نهایی فناوری‌ها، از روش ویکور استفاده می‌شود. در این روش، مقدار v=۰/۵ در نظر گرفته شد تا تعادلی میان حداکثرسازی مطلوبیت گروهی (موفقیت کلی پروژه و رضایت اکثر ذینفعان) و حداقل‌سازی نارضایتی فردی (جلوگیری از تأثیر منفی شدید بر روی یک گزینه خاص) برقرار گردد. نتایج نهایی نشان می‌دهد که فناوری سیکل ترکیبی در صدر اولویت‌های ایران برای تولید برق قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه گاز طبیعی سوخت اصلی نیروگاه سیکل ترکیبی است، سهولت دسترسی به منابع گاز طبیعی فراوان در کشور و همچنین وجود زیرساخت‌های

گسترده و توسعه‌یافته در این حوزه، دلیل اصلی قرار گرفتن این تکنولوژی در صدر اولویت‌ها است. این فناوری با ترکیب دو نوع سیکل حرارتی، بازدهی بسیار بالایی را ارائه می‌دهد و مصرف سوخت را کاهش می‌دهد. جدول **۵** نتایج نهایی اولویت‌بندی فناوری‌های تولید برق را نشان می‌دهد.

جدول ۵. اولویت‌بندی تکنولوژی‌های تولید برق در ایران
Table 5. Prioritization of electricity generation technologies in Iran

اولویت	تکنولوژی
۱	سیکل ترکیبی
۲	گازی
۳	فتوولتائیک (PV)
۴	دیزلی
۵	آبی
۶	بادی
۷	نفتی
۸	حرارتی خورشیدی (CSP)
۹	زیست‌توده
۱۰	زمین‌گرمایی
۱۱	هسته‌ای
۱۲	زغال‌سنگ
۱۳	هیدروژن سبز

در کشوری مانند ایران که منابع گازی ارزان و فراوان دارد، استفاده از نیروگاه‌های سیکل ترکیبی منطقی و مقرون‌به‌صرفه است. پس‌ازآن، تکنولوژی گاز طبیعی در رتبه دوم قرار می‌گیرد. ایران با در اختیار داشتن دومین ذخایر گاز طبیعی در جهان، موقعیتی ممتاز برای استفاده از نیروگاه‌های گازی دارد که هزینه‌های تولید و انتقال برق را به‌شدت کاهش می‌دهد و استقلال انرژی را افزایش می‌دهد. لازم به ذکر است که گاز طبیعی یکی از پاک‌ترین انرژی‌های فسیلی است و اثرات مخرب زیست‌محیطی کمی نسبت به سایر سوخت‌های فسیلی دارد و این موضوع یکی از مهم‌ترین دلایل انتخاب آن می‌باشد. فناوری خورشیدی فتوولتائیک به دلیل تابش بالای خورشید در ایران و امکان بهره‌برداری گسترده از آن، در جایگاه سوم قرار می‌گیرد. ایران با داشتن بیش از ۳۰۰ روز آفتابی در سال، یکی از کشورهای مستعد برای توسعه این نوع انرژی است. همچنین نصب آسان، هزینه پایین نگهداری و امکان استفاده در مناطق دورافتاده، از دیگر مزایای این فناوری است؛ بنابراین، فناوری خورشیدی فتوولتائیک بهترین فناوری تجدیدپذیر جهت تولید برق انتخاب می‌شود. در جایگاه چهارم، فناوری دیزلی قرار می‌گیرد. اگرچه این فناوری دارای آلایندگی بالا و هزینه سوخت بیشتر نسبت به سایر گزینه‌هاست، اما انعطاف‌پذیری بالا، امکان استقرار سریع و عدم نیاز به شبکه سراسری باعث شده همچنان موردتوجه باشد، به‌ویژه در شرایط اضطراری و برای مناطق محروم. نیروگاه‌های برق‌آبی (هیدروالکتریک) با تکیه بر تجربه و سابقه طولانی در ایران و بهره‌گیری از منابع آبی داخلی، در رتبه پنجم جای گرفته‌اند. با وجود بحران آب، همچنان در برخی مناطق کشور پتانسیل‌های قابل بهره‌برداری وجود دارد. توربین‌های بادی نیز به دلیل ظرفیت بالای باد در مناطقی مانند منجیل و سیستان و مزایای زیست‌محیطی، رتبه ششم را به خود اختصاص داده‌اند. بااین‌حال، هزینه‌های بالا و نیاز به مدیریت دقیق بار شبکه از موانع اصلی توسعه گسترده آن است. در رتبه هفتم، فناوری نفتی (کک نفتی و مایعات نفتی) قرار دارد. این فناوری به دلیل وجود زیرساخت‌های نفتی گسترده و منابع در دسترس، همچنان یکی از گزینه‌های مطرح است. هرچند به دلیل مسائل زیست‌محیطی در حال کاهش تدریجی استفاده است. فناوری حرارتی خورشیدی باوجود مزایای ذخیره‌سازی انرژی و توانایی تولید برق پیوسته، به دلیل پیچیدگی فنی و هزینه ساخت بالا در رتبه هشتم قرارگرفته است. این فناوری نیازمند فضای زیاد و مناطق با تابش مداوم و شدید خورشید است. در جایگاه نهم، فناوری زیست‌توده قرار دارد که بر پایه استفاده از پسماندهای کشاورزی، شهری و صنعتی است. این فناوری می‌تواند نقش مهمی در مدیریت ضایعات و کاهش آلایندگی ایفا کند؛ اما عدم زنجیره تأمین مناسب و زیرساخت‌های فنی، باعث شده است سهم محدودی در سبد انرژی کشور داشته باشد. زمین‌گرمایی (ژئوترمال) در رتبه دهم قرار می‌گیرد. با اینکه این فناوری پایداری بالایی در تولید برق دارد، اما نیاز به سرمایه‌گذاری اولیه بالا، حفاری عمیق و تکنولوژی تخصصی باعث شده توسعه آن کند پیش رود. در رتبه یازدهم، انرژی هسته‌ای قرار دارد. با وجود توان تولید برق بالا، اما مسائل ایمنی، نگرانی‌های زیست‌محیطی، هزینه بالا و همچنین ملاحظات سیاسی و بین‌المللی باعث شده استفاده از این فناوری در ایران محدود بماند. زغال‌سنگ در رتبه دوازدهم قرارگرفته است. آلایندگی بسیار بالا، فشارهای جهانی برای کاهش استفاده از سوخت‌های فسیلی و سیاست‌های

زیست‌محیطی، اصلی‌ترین دلایل کاهش اولویت این فناوری در ایران هستند. درنهایت، فناوری نیروگاه هیدروژن سبز در پایین‌ترین رتبه قرار دارد. با وجود آن که این فناوری یکی از امیدوارکننده‌ترین منابع تولید انرژی پاک در آینده است، اما هزینه بسیار بالا، نیاز به فناوری‌های پیشرفته و زیرساخت‌های گسترده که در حال حاضر در ایران فراهم نیست، باعث شده است در وضعیت فعلی، جایگاه آخر را به خود اختصاص دهد.

۵- نتیجه‌گیری

برق، به‌عنوان یکی از بنیادی‌ترین اشکال انرژی، نقشی کلیدی در پشتیبانی از رشد اقتصادی و بهبود کیفیت زندگی ایفا می‌کند. ازآنجاکه روش‌های تولید برق از نظر جنبه‌های فنی، اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی تفاوت‌های چشمگیری دارند، ارزیابی و اولویت‌بندی آن‌ها گامی اساسی در مسیر برنامه‌ریزی هوشمندانه و پایدار در بخش انرژی محسوب می‌شود. در این مقاله، مجموعه‌ای از فناوری‌های متداول تولید برق در ایران موردبررسی قرار گرفت و با بهره‌گیری از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، به‌ویژه ترکیب تکنیک‌های بهترین-بدترین و ویکور، تحلیل دقیقی بر مبنای معیارهای منتخب صورت پذیرفت. نتایج تحلیل‌ها نشان داد که نیروگاه‌های سیکل ترکیبی، گازی و خورشیدی فتوولتائیک به ترتیب از بالاترین اولویت برخوردارند. سیکل ترکیبی به‌عنوان اولویت اول، با بهره‌گیری از دو نوع توربین و بازدهی بالا، به‌عنوان یک گزینه کارآمد و نسبتاً کم‌هزینه مطرح است. نیروگاه‌های گازی نیز در اولویت دوم به دلیل ساخت سریع، انعطاف‌پذیری عملیاتی و هزینه سرمایه‌گذاری پایین، جایگاه مناسبی یافته‌اند. تکنولوژی فتوولتائیک هم در جایگاه سوم با تکیه بر منبع تجدیدپذیر خورشید، گرچه چالش‌هایی ازجمله وابستگی به شرایط آب و هوایی دارد، اما در جهت کاهش آلاینده‌ها و تنوع‌بخشی به سبد انرژی نقش مهمی ایفا می‌کند. در رتبه‌های بعدی نیز دیگر تکنولوژی‌های تولید برق قرار گرفتند. بر پایه‌ی این یافته‌ها، می‌توان گفت که تمرکز بر توسعه و به‌کارگیری فناوری‌های برتر شناسایی‌شده، به‌ویژه در شرایط اقلیمی و اقتصادی ایران، می‌تواند مسیر پایدارتری برای تأمین انرژی کشور فراهم آورد و مبنایی مناسب برای تصمیم‌گیری‌های آتی در حوزه انرژی را فراهم سازد. در ادامه این پژوهش، پیشنهاد می‌شود که در پژوهش‌های آینده، سناریوهای مختلف مانند سناریوی زیست‌محیطی سخت‌گیرانه یا کمبود منابع آب در نظر گرفته‌شده و تغییر رتبه‌بندی‌ها در این شرایط موردبررسی قرار گیرد. همچنین، می‌توان نتایج روش‌های تصمیم‌گیری دیگر مانند AHP-TOPSIS را با نتایج این پژوهش مورد مقایسه قرار داد یا ترکیب روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره با مدل‌های بهینه‌سازی یا شبیه‌سازی می‌تواند به‌دقت و عمق تحلیل‌ها بیفزاید.

مشارکت‌های نویسندگان

همه نویسندگان در مقاله نقش و سهم یکسان داشته‌اند.

تضاد منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ‌گونه تضاد منافع مرتبط با تحقیق حاضر ندارند و نتایج به‌صورت بی‌طرفانه و بدون دخالت منافع شخصی یا حرفه‌ای به‌دست‌آمده است.

قدردانی

نویسندگان از عوامل اجرایی نشریه مهندسی سیستم و بهره‌وری قدردانی می‌نمایند.

مراجع

Abbasian, M., & Nahavandi, N. (2022). Evaluation and selection of turbine suppliers for wind farms using the combined approach of AHP and TOPSIS with the aim of sustainable development of the electricity industry. *Journal of Management and Sustainable Development Studies, 2*(1), 1–27. https://doi.org/10.30495/msds.2022.690696 (In Persian)

Abdolahinia, H., Heidarizadeh, M., & Rahmati, I. (2024). Assessing Iran and its neighbors for prospects and challenges: The case of the electrical sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 193*, Article 114190. https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114190

Amiri, A., Esmaeilnia, A., Daghighi Asli, A., & Manzoor, D. (2023). Identifying factors affecting electricity production technologies with the approach of energy uncertainty. *Journal of Energy Economics Modeling, 1*(2), 57–98.

Lenarczyk, A., Jaskólski, M., & Bućko, P. (2022). The application of a multi-criteria decision-making for indication of directions of the development of renewable energy sources in the context of energy policy. *Energies, 15*(24), Article 9629. https://doi.org/10.3390/en15249629

Mahdi, M., Vahidinasab, V., & Ghazizadeh, M. S. (2022). The evaluation and prioritization framework of renewable energy sources and sustainable development in Iran, based on the multi-criteria decision-making method. *Journal of Energy Planning and Policy Research, 8*(2), 51–63. (In Persian)

Manzoor, D., & Rahimi, A. (2015). Prioritization of the electricity power plant by using the multi-criteria decision-making models. *Iranian Energy Economics, 4*(14), 191–215. (In Persian)

Opricovic, S. (1998). *Multicriteria optimization of civil engineering systems*. Faculty of Civil Engineering.

Opricovic, S., & Tzeng, G.-H. (2004). Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *European Journal of Operational Research, 156*(2), 445–455. https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00020-1

Parvaneh, F., & Hammad, A. (2024). Application of multi-criteria decision-making (MCDM) to select the most sustainable power-generating technology. *Sustainability, 16*(8), Article 3287. https://doi.org/10.3390/su16083287

Rahman, M. A., Ahmed, T., Rana, M. M., Hossain, B., Bhuiyan, M. R., & Alam, M. J. (2024, December). A comparative analysis of MCDM methods for selecting the optimal renewable energy source for Rajshahi, Bangladesh. In *2024 International Conference on Recent Progresses in Science, Engineering and Technology (ICRPSET)* (pp. 1–5). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICRPSET63103.2024.10657636

Rezaei, J. (2015). Best-worst multi-criteria decision-making method. *Omega, 53*, 49–57. https://doi.org/10.1016/j.omega.2014.11.009

Rezaei, J. (2016). Best-worst multi-criteria decision-making method: Some properties and a linear model. *Omega, 64*, 126–130. https://doi.org/10.1016/j.omega.2015.12.001

Rezaei, M. (2022). A multi-criteria decision-making approach for sustainable energy prioritization. *Environmental Energy and Economic Research, 6*(1), 1–19. https://doi.org/10.22097/eeer.2021.292613.1207
https://doi.org/10.22080/jeem.2024.26573.1004

Beheshtinia, M. A., & Sedadi, F. (2022). Prioritization of renewable power plant construction using improved digital logic and fuzzy VIKOR method. *Energy Engineering and Management, 7*(2), 52–61. (In Persian)

Ershadi, M. J., Kianmehr, N., Nabatchian, M., & Dinmohammadi, L. (2024). Designing a productivity assessment model to identify and prioritize influential factors and examine obstacles facing Iranian research organizations. *System Engineering and Productivity, 4*(2), 31–46. https://doi.org/10.22034/msb.2024.2019692.1171 (In Persian)

Ghaed, E. (2018). *Selecting electricity generation technology with a sustainable development approach using MCDM methods (Case study: Iran)* [Master's thesis, Shahrood University of Technology]. (In Persian)

Ijabi, E., Bayat, R., & Shirvani, M. (2019). Prioritization energy types in Iran with the aim of increasing energy security in the 1404 horizon (using hierarchical analysis method). *Strategic Studies of Public Policy, 8*(29), 135–157. (In Persian)

Kazemi, A., Abdolahpour, S., & Goldansaz, S. M. R. (2020). Economic, social and environmental assessment of electricity generation from renewable and gas technologies. *Iranian Journal of Energy, 23*(3), 7–33. (In Persian)

Kenshlow, H., & Hosseini, S. A. (2024). Studying the relationship between human resource development and justice, satisfaction and increasing the efficiency of social security employees. *System Engineering and Productivity, 4*(3), 1–15. https://doi.org/10.22034/msb.2024.2013266.1161 (In Persian)

Khazaee, M., Zahedi, R., Faryadras, R., & Ahmadi, A. (2022). Potential assessment of renewable energy resources and their power plant capacities in Iran. *Global Journal of Ecology, 7*(2), 60–71. https://doi.org/10.17352/gje.000062

Lak Kamari, M., Isvand, H., & Alhuyi Nazari, M. (2020). Applications of multi-criteria decision-making (MCDM) methods in renewable energy development: A review. *Renewable Energy Research and Applications, 1*(1), 47–54. https://doi.org/10.22044/RERA.2020.8541.1006

Sabeti Motlagh, S., Panahi, M., Hemmasi, A. H., & Haj Mollaali Kani, A. (2022). Modeling and prioritizing Iran's thermal power plant development policies based on environmental constraints. *Quarterly Energy Economics Review, 17*(71), 147–186. (In Persian)

Si, J., Marjanovic-Halburd, L., Nasiri, F., & Bell, S. (2016). Assessment of building-integrated green technologies: A review and case study on applications of multi-criteria decision making (MCDM) method. *Sustainable Cities and Society, 27*, 106–115. https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.06.013

Squadrito, G., Maggio, G., & Nicita, A. (2023). The green hydrogen revolution. *Renewable Energy, 216*, Article 119041. https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119041

Stein, E. W. (2013). A comprehensive multi-criteria model to rank electric energy production technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 22*, 640–654. https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.001

Streimikiene, D., Balezentis, T., Krisciukaitienė, I., & Balezentis, A. (2012). Prioritizing sustainable electricity production technologies: MCDM approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16*(5), 3302–3311. https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.067

Torabi, H., Hosnavi, R., & Arabi, R. (2025). Identifying factors affecting human capital enhancement through knowledge sharing (a case study of Daneshmand Institute). *System Engineering and Productivity, 5*(2), 73–95. https://doi.org/10.22034/sep.2025.2052956.1267 (In Persian)

U.S. Energy Information Administration. (2023). *International energy outlook 2023*. https://www.eia.gov/outlooks/ieo/

U.S. Energy Information Administration. (2024). *Country analysis brief: Iran*. U.S. Department of Energy. https://www.eia.gov/international/content/analysis/countries_long/Iran/pdf/Iran%20CAB%202024.pdf

World Bank. (2024). *World energy outlook 2024*. https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024

Yazdi, N., Fateh-rad, M., Kadkhodapour, J., & Tahmasbi, S. (2024). Spatial analysis of the concentration of knowledge-based firms in Iran. *Spatial Planning, 14*(4), 27–52. https://doi.org/10.22108/sppl.2024.138926.1742

Zangeneh, A., Jadid, S., & Rahimi-Kian, A. (2009). A hierarchical decision-making model for the prioritization of distributed generation technologies: A case study for Iran. *Energy Policy, 37*(12), 5752–5763. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.08.040